

セメント混合により改良した飽和軟弱粘性土の強度変形特性 VI

——長期加圧養生の影響——

Mechanical Properties of Saturated Soft Clay Improved by Cement-Mixing VI

——Effects of Long-Term Curing——

小林 晃*・龍岡 文夫**

Akira KOBAYASHI and Fumio TATSUOKA

1. 緒 言

一般のセメント改良土の三軸試験では圧密排水の場合にせよ、圧密非排水の場合にせよ、所定の期間大気圧の下で水中養生をして、次に、短期間圧密してからせん断を行う(図3¹⁷⁾参照)。ところが、原位置では、圧密と固話が同時に進行する場合があるであろう。その場合は上記の試験法は実際の状態を厳密にシミュレーションしていないことになる。そこで、ある程度の期間圧力を加えた下で養生することによって、圧密と固話が同時に生ずる場合のセメント改良土の力学特性について調べた。

2. 実験方法

一軸圧縮強度の差が大きい $a_w=10\%$ および 20% の2種類の供試体を用いて、三軸セル内で拘束圧をかけたまま28日間、排水および非排水状態で養生してから、非排水試験等各種の実験を行った。排水状態での加圧養生は、固化中に圧密がよく行われる状況を、非排水状態での加圧養生は、固化中に圧密がまったく行われない状況を再現しようとしたものである。

試料はモールドに打ち込み後、約12時間の後、取り扱いができる程度に固化してから、三軸セルにセットした。0.3mm厚のメンブレンを2枚用いて漏水が生じないようにした。セル液体としては、大部分(12本の内8本の供試体)の場合純粋グリセリンを用いた。拘束圧 0.1 kgf/cm^2 、背圧 0.0 kgf/cm^2 の状態を初期状態とした後、全圧 1 kgf/cm^2 を1時間かけて加えて、1時間放置した。排水養生の場合は、所定の有効圧密応力状態にして、そのまま長期間放置した。非排水養生の場合は、 $\sigma_c=1.1 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_{BP}=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\sigma'_c=0.1 \text{ kgf/cm}^2$ の状態で非排水状態にして、側圧のみを表3に示すように所定の値まで上昇させて、そのまま非排水状態のまま長期間放置した。非排水養生の場合のデータからB値についての情報が得られるので若干検討してみよう。たとえば、供試体PU20-4では、側圧を上昇したときの有効応力 σ'_c 変化は、 0.1 kgf/cm^2 から 0.23 kgf/cm^2 であるか

* 日本道路公団

** 東京大学生産技術研究所 第5部

表3 長期加圧養生供試体リスト

a_w (%)	供試体名	加圧養生中の排水条件	加圧養生開始時の応力条件			加圧養生終了時の応力条件			非排水せん断開始時の応力条件		
			σ_c	σ_{BP}	σ'_c	σ_c	σ_{BP}	σ'_c	σ_c	σ_{BP}	σ'_c
20	PD20-4	排水	5	1	4	5	1	4	5	1	4
	PD20-3		4	1	3	4	1	3	4	1	3
	PD20-2		3	1	2	3	1	2	3	1	2
	PU20-4	非排水	5	4.77	0.23	5	0.10	4.90	5	1	4
	PU20-3		4	—	—	4	—	—	4	1	3
	PU20-2		3	2.92	0.08	3	—	—	3	1	2
10	PD10-3	排水	4	1	3	4	1	3	4	1	3
	PD10-U		4	1	3	4	1	3	一軸試験		
	PU10-0.38	非排水	4	3.91	0.09	4	3.51	0.49	4	3.62	0.38
	PU10-U		4	3.86	0.14	4	—	—	一軸試験		
	PU10-3		4	3.91	0.09	4	—	—	4	1	3

(大気圧湿潤養生)

10	A10-3	排水	0	0	0	0	0	0	4	1	3
	A10-0.12		0	0	0	0	0	0	4	3.88	0.12
	A10-U		0	0	0	0	0	0	一軸試験		

(—:不明)

注) 単位は全て kgf/cm^2

* 印の一軸試験はゴムスリーブ2枚かけたまま実施

ら、B値は $(4.77-1.0)/(5-1.1)=0.97$ で十分大きな値であった。同様に、PU20-2では、 B 値=1.0、PU10-0.38では、 B 値=1.0、PU10-Uでは、 B 値=0.99といずれも十分に大きい値であり、供試体は十分に高い飽和度を有していたことを示している。

試験条件は表3にまとめてある。長期加圧養生中の状態変化は図28、29にまとめてある。いくつかの供試体では、記録を最初から、あるいは途中で中止せざるを得なかった。排水養生の場合、大部分の体積収縮、軸ひずみは短期間で終了している。これらのデータを見ると、普通の土の場合とは逆な現象が見られる。すなわち、

(1) 排水養生では、だいたい2日目以降で軸方向に

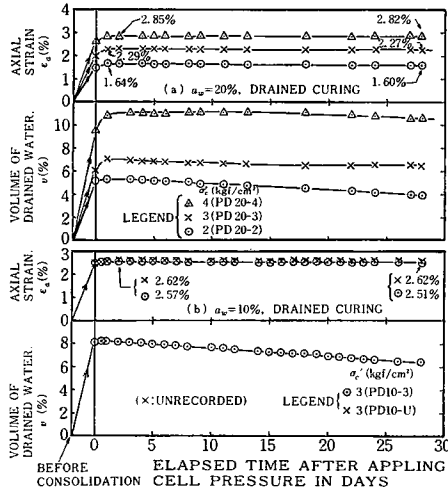


図28 長期加圧排水養生中の状態変化

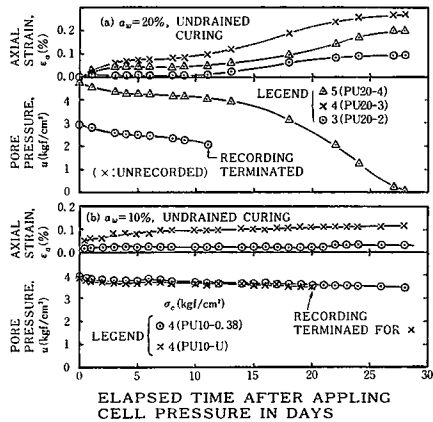


図29 長期加圧非排水養生中の状態変化

非常に微少ではあるが伸びが生じている。

- (2) 排水養生では、大体2日目以降で供試体への吸水が生じている。
- (3) 非排水養生では、最初から軸方向に収縮が生じていてそれが継続している。
- (4) 非排水養生では、最初から間隙水圧の減少が生じていてそれが継続している。

これらの現象は、セメントの水和反応によるセメンテーションの進行によって生じるものと思われる。(1)の現象は通常の大気圧下での水中養生のコンクリートでも見られる現象である。¹³⁾セメントと水は水和反応により総体積量は減るので、¹³⁾(1)の現象に伴って(2)の現象が生じてもおかしくはないと思われる。非排水状態にすれば、水和反応により総体積は減るので(3)の現象が生じる。また、水和反応による水の体積減少分は、水和物の体積増加分より多いのだから非排水状態では当然

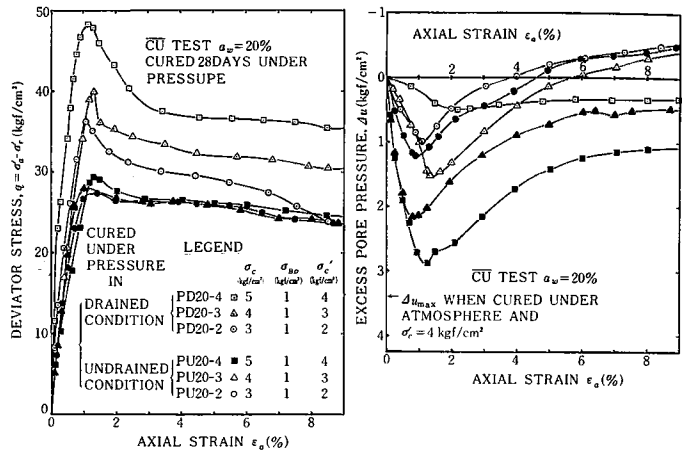


図30 $a_w = 20\%$ における実験結果

(4)の現象も生ずるのであろう。 a_w の大きい方が間隙水圧の減少の程度が大きいのはセメントの水和反応がより激しいからであろう。

表3に示すように $a_w = 20\%$ の場合は、非排水せん断開始時の全応力および有効応力状態は、排水養生の供試体と非排水養生の供試体で同じとした。 $a_w = 10\%$ の場合は、別到大気圧下での水中養生を同時に3つの供試体について行っている。 $a_w = 20\%$ については、図30に示す実験結果から次のことが分かる。

(1) 非排水養生では、養生中に有効拘束圧 σ'_c が増加しているにもかかわらず、大気圧の下で水中養生したものとその変形強度特性にほとんど差がない。詳しく見ると、同じ $\sigma'_c = 4 \text{ kgf/cm}^2$ の条件で、大気圧養生したもの比べると、図30に示すように Δu の発生の方はやや小さくなっている。他の σ'_c の値についても同様ことが言える。これは、非排水養生中、固化的ため若干ではあるが収縮が生じているが大気圧水中養生では固化的のとき、吸水が生ずるため、その分だけ差が生ずるのであろう。加圧非排水養生中の軸ひずみはPU=20-4, 3, 2の供試体で、それぞれ0.2%, 0.27%, 0.091%であった。しかし、全体的に見て、加圧下での非排水養生は通常の大気圧下での供試体からの水の出入りを自由に許す排水水中養生と同等であると言えよう。

(2) 加圧排水養生したものは、加圧非排水養生したもの、大気圧下で排水養生したものに比べると σ'_c が大きいほど、明らかに強度は大きくなっているし、 Δu の発生の方も小さい。図31に加圧排水養生した供試体の $q = q_{max}$ および $q = q_R$ の時の有効応力状態を、大気圧下で排水養生した場合の、ピーク強度および残留強度の平均曲線と比べてあるが明らかに、加圧しながら排水養生し

研 究 速 報

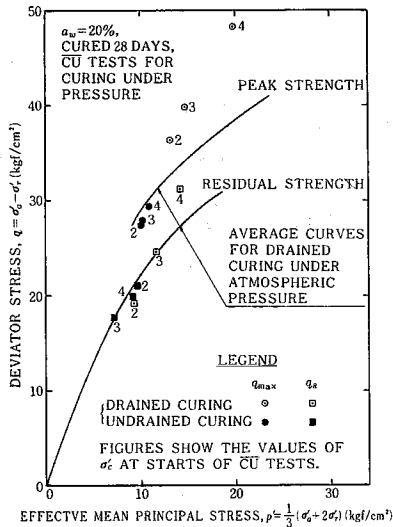


図31 $a_w = 20\%$ における大気圧下養生と加圧養生した供試体の破壊時における有効応力状態の比較

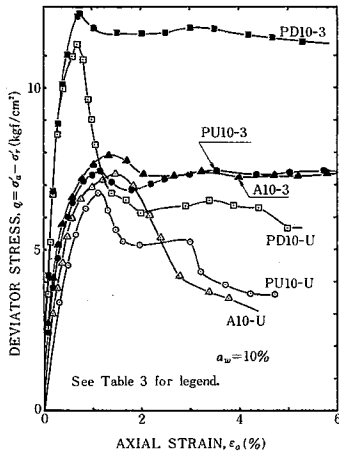


図33 $a_w = 10\%$ における実験結果 2

た場合のデータポイントはこの曲線より上に位置している。すなわち、加圧下で排水養生した供試体が非排水せん断した時に強くなるのは、単に Δu の発生が小さくなるからではなく、含水比が加圧排水養生中に小さくなったためであり、 σ'_c が大きいほど含水比が小さくなり、より強くなったのであろう。

$a_w = 10\%$ の場合は、表 3 に示すように各種の実際の状況に合わせて試験条件を種々変化させてみた。なお、A 10-0.12 の供試体は大気圧下で水中養生したものであり、PU 1.0-0.38 と比較するためのものである。この供試体では $\sigma_c = 1.1 \text{ kgf/cm}^2$, $\sigma_{BP} = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\sigma'_c = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$ の状態から非排水のまま σ_c を 4 kgf/cm^2 にまで上昇させている。B 値は $(3.88 - 1)/(4 - 1.1) = 0.99$

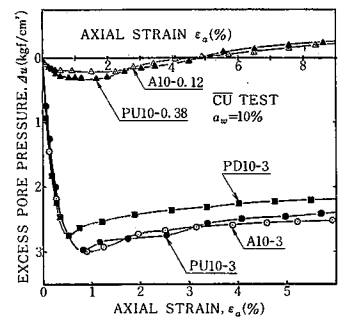
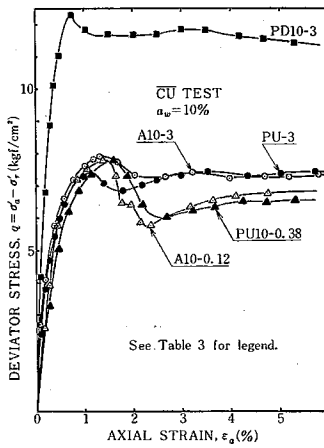


図32 $a_w = 10\%$ における実験結果 1

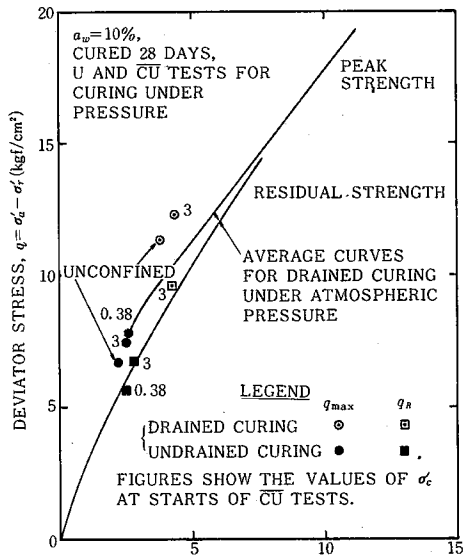


図34 $a_w = 10\%$ における大気圧下養生と加圧養生した供試体の破壊時における有効応力状態の比較

であった。図32, 33, 34 に示す結果から次のことが分かる。

(1) PD 10-3, PU 10-3 の結果を比べて分かるように、非排水せん断開始時は同じく $\sigma'_c = 3 \text{ kgf/cm}^2$ でも、加圧排水養生した PD 10-3 の方が、加圧非排水養生の PU 10-3 よりもはるかに強い。両者の Δu の大きさには大差がないことから、この強度差は、せん断中の有効応力状態の差によるものではなく、含水比の差によるものである(図 34 参照)。これは $a_w = 20\%$ の場合と同じであるが、今回の実験の範囲では $a_w = 10\%$ の場合の方が、同一の圧密応力における加圧排水養生による強度増加率は、大きいと言える。

(2) PU 10-0.38 と A 10-0.12, PU 10-3 と A 10-3

の結果を比較して分かるように、加圧非排水養生したものと大気圧排水養生したものの間の強度変形特性の差はほとんどない。 $a_w=20\%$ の場合よりも、 Δu に関する差は特に小さい。これは、 $a_w=10\%$ の場合の方が、加圧下非排水養生中のセメンテーションの進行による σ_c' の変化が少なかったためと推定される。

(3) PD10-U, PU10-U は、原位置改良土地盤からサンプリングしてきた試料を一軸試験する場合をシミュレーションするためのもので、A10-U は、それとの比較のためである。加圧非排水養生した試料と大気圧下水中養生した試料の q_u は等しいが、明らかに、加圧排水養生した試料の方が、 q_u は大きくなっている。PD10-U と PD10-3 の比較をしてみると、 q_{max} はほとんど等しいが、残留強度特性は全く異っている。PU10-U と PU10-0.38 の比較でもそのことが言える。すなわち養生時の排水(吸水)条件にかかわらず原位置改良土地盤からサンプリングしてきた試料の一軸試験をすることにより、 q_{max} は適切に評価できるが、残留強度の正しい評価はできない。なお、PD10-U, PU10-U で残留強度がゴムスリーブのない A10-U よりもやや残留強度が大きく出ているのは、ゴムスリーブ2枚かけたまま一軸試験を実施しているため供試体に若干の拘束力が働いたためと思われる。

川崎ら⁴⁾ は、品川粘土を用いて、粘性土の初期含水比と改良土の一軸圧縮強さの関係を求めている(図35)。今回の研究では、このような実験を行っていないので、このデータを用いて長期加圧排水養生による強度増加について検討してみる(表4参照)。表4における v は長期加圧排水養生中での最大の排水量 $v(\%)$ であり、 $w_i=120\%$ とすると、この排水による w_i の減少を考慮した時の初期含水比(等価初期含水比、 w_{ie})は $G_s=2.65$ とすると、 $w_{ie}=120(1-0.0131v)$ (%) となる。図35から、 w_i が 120% の時と他の w_i の時の q_u の比を読みとった値が α_e である。 α_m は、加圧排水養生した供試体の三軸非排水試験における q_{max} を、図10¹⁷⁾ に示すデータから読みとった同一の σ_c' に対する大気圧下で湿潤養生した供試体の三軸非排水試験における q_{max} で除した値である。 α_e と α_m の値はよく似ており、加圧排水養生による強度増加は、主に含水比の低下によるものであることを示唆している。

3. 結 語

(1) 原位置で加圧されながらセメンテーションによる固化が進行する時、排水により含水比が低下すれば、排水のない場合よりも非排水せん断強度は増加する。他の条件が同一であれば a_w が小さいほどこの増加率が大きい。この強度増加は、せん断中の過剰間隙水圧の発生

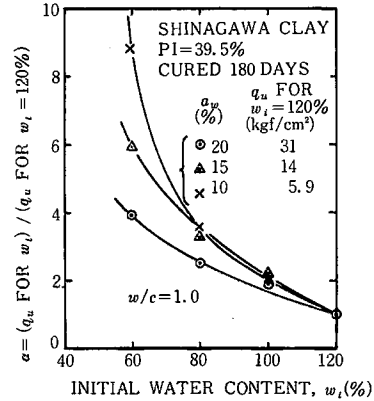


図35 初期含水比 w_i が一軸圧縮強度 q_u に及ぼす影響(川崎ら⁴⁾による)

表4 初期含水比の低下による強度増加率

供試体	養生中の最大排水量 $v(\%)$	等価初期含水比 $w_{ie}(\%)*$	図35による強度増加率 α_e	実測による強度増加率** α_m
PD20-2	5.3	112	1.25	1.29
PD20-3	7.1	109	1.35	1.41
PD20-4	11.1	103	1.55	1.68
PD10-3	8.2	107	1.65	1.62

* $120(1-0.0131v)$

** (加圧排水養生した供試体の q_{max}) / (大気圧下で水中養生した $w_i=120\%$ の供試体の q_{max}) (ただし、同一の養生日数、 σ_c' に対する圧密非排水せん断試験での強度比)

量の減少によるものではなく、含水比の低下によるものである。

(2) 拘束圧下でも排水(吸水)のない状態でセメンテーションが進行する時は、養生中に有効応力が増加していても、大気圧中で排水(吸水)状態でセメンテーションが進行する場合と、同じ強度特性となる。

(3) 通常の養生方法(大気圧下での排水(吸水)養生)によるセメント改良土の強度は、原位置で若干でも排水されながら固化した場合の強度よりも小さく、まったく排水(吸水)されないで固化した場合の強度と同等である。

(4) 原位置改良地盤から採取した試料を一軸試験をした場合は、養生中の排水条件の差異によらず、初期有効拘束圧がある状態からの非排水せん断した場合とピーク強度(q_{max})は大差ないが、残留強度は非常に過小評価となる。(1982年8月5日受理)

参 考 文 献

- 17) 小林晃・龍岡文夫(1982):“セメント混合により改良した飽和軟弱粘性土の強度変形特性 II” 生産研究, Vol. 34, No. 8, pp. 347~350
- 18) 東京大学生産技術研究所第5部魚本助教による